

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.06.017

轨道交通地铁车辆测速平台 方案研究及应用

吴君, 王俊平

(北京轨道交通技术装备集团有限公司, 北京 100070)

摘要: 针对目前地铁车辆各系统各自配置速度传感器, 导致车辆速度传感器型号不一、数量众多的问题, 构建了一种车辆测速平台。本文提出测速平台的总体设计原则, 在分析车辆牵引、制动、信号、走行部等系统车速需求的基础上, 提出测速平台的技术方案。该平台提出对车辆各系统测速传感器进行统型, 综合速度传感器和加速度计信息提出计算车速的方法, 结合地面应答器设备信息提出计算参考轮径值的方法。测速平台提出硬线和网络两种灵活传输车速信息的方式。研究结果表明: 与传统测速方式相比, 该测速平台为各系统提供统一且更准确的车速信息, 能够满足牵引、制动、信号、走行部等系统使用需求。

关键词: 轨道交通; 地铁车辆; 测速平台; 车速; 参考轮径值

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)06-0123-07

Research and Application of a Rail Transit Metro Vehicle Speed Measurement Platform Scheme

WU Jun, WANG Junping

(Beijing Rail Transit Technology Equipment Group Co., Ltd., Beijing 100070)

Abstract: A vehicle speed measurement platform was developed to address the problem of diverse speed sensor models and an excessive number of sensors. This study outlines the overall design principles of the speed measurement platform, informed by an analysis of speed requirements for systems including vehicle traction, braking, signaling, and running gears. The proposed technical scheme advocates for the unification of speed sensors across various vehicle systems and introduces a method for calculating vehicle speed by integrating data from speed sensors and accelerometers. Additionally, it provides a technique for calculating the reference wheel diameter in conjunction with ground responder equipment information. The platform features two flexible methods for transmitting speed information: hardlines and networks. The research findings indicate that, compared to traditional speed measurement methods, this platform offers a unified and more accurate source of vehicle speed information, effectively meeting the requirements of traction, braking, signaling, and running gear systems.

Keywords: rail transit; subway vehicle; speed measurement platform; vehicle speed; reference wheel diameter

为了测量车辆速度, 地铁车辆各系统均配置速度传感器, 车辆速度传感器类型多、数量多, 转向架走线复杂。北京地铁某线路4编组地铁车辆, 牵引系统、制动系统及信号系统各自配置速度传感器, 速度传

感器数量多达32个, 型号多达4种, 数量多且型号不一致的传感器不仅带来后期维护成本增高的问题, 而且各系统车速来源不一致, 给车辆的精准控制带来很大困难。随着车辆控制一体化和虚拟编组技术的快速发

收稿日期: 2024-02-19 修回日期: 2024-04-03

第一作者: 吴君, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通车辆设计研究, wujun@rtte.cn

引用格式: 吴君, 王俊平. 轨道交通地铁车辆测速平台方案研究及应用[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(6): 123-129.

WU Jun, WANG Junping. Research and application of a rail transit metro vehicle speed measurement platform scheme[J].

Urban rapid rail transit, 2024, 37(6): 123-129.

展,构建车辆统一的测速平台,提升车辆控制性能的需求日益凸显。

既有列车测速系统中常使用轮轴传感器进行测速定位,轮轴式速度传感器可通过检测其所在车轮的转动圈数来精确计算出车轮的转速^[1-4]。牵引系统基于安装在电机轴端的霍尔速度传感器,计算电机转速^[5]。制动系统基于安装在轮对轴端的霍尔速度传感器,计算车速^[6]。信号系统基于安装在轮对轴端的光电传感器或霍尔速度传感器及加速度传感器,计算车速^[5,7-8]。

目前,在中低速磁浮车辆上广泛使用了统一的测速平台,测速平台为牵引、制动和信号系统提供统一的车速信息^[9-10],轮轨车辆可借鉴磁浮车辆测速平台应用经验^[9-10],探索轮轨车辆构建统一测速平台的可行性。

车辆控制一体化是目前的发展趋势,控制一体化平台的构建使得车辆各系统可以共享更多的车辆信息,其中包括车辆车速、加速度等信息。随着走行部在线监测系统智能化系统的发展,车辆牵引、制动、信号、网络、走行部在线监测等系统都需要接入车辆车速信息。本文提出了一种轮轨车辆测速平台,统一速度传感器型号,统一对各系统提供更准确的车速信息和轮径校验值,通过硬线和网络同时传输车速信息,满足车辆智能化发展的需要。

1 测速平台总体原则

本文提供一种测速平台技术方案,主要是为车辆提供统一的测速平台,牵引、制动、信号、网络等系统从测速平台获取车速信息、轮径信息,同时测速平台提供零速和超速信息。车辆各系统无需重复处理上述信息,由于各系统信息来源一致,也有利于后续的故障排查工作。

测速平台统一了速度传感器型号,大大减少速度传感器数量,简化转向架走线,降低后期维护运营成本。

测速平台可提供更丰富更精确的车辆信息,综合速度传感器和加速度计信息,提供更准确的车速信息;结合地面应答器设备,为各系统提供更准确的轮径校验值,提升各系统的控制精度,提升车辆的运行性能。

测速平台可通过硬线和网络同时传输车速信息,确保各系统接入车速信息的接口方式更加灵活。

以4编组车辆为例,测速平台实施方案如下:①头车安装 SIL4 级测速单元,用于列车级测速和车辆级测速;②中间车安装 SIL2 级测速单元,用于车辆级测速;③传感器统一型号,采用双通道霍尔传感器;④测速

单元接入时间敏感网络(Time-Sensitive Network, TSN)骨干网,通过实时以太网接口提供给牵引、制动、网络和信号系统。

2 车辆各系统车速需求分析

2.1 牵引系统需求

测速单元为每辆车(动车,动轴)提供车速接口,包括每个轴的轮径值、车速值和方向,提供的车速信息周期为 30 ms(安全等级 SIL2)。牵引系统可通过测速平台获取各车各轴车速值,用于牵引相关控制。

2.2 制动系统需求

测速单元为每辆车提供车速接口,包括每个轴的轮径值和车速值,提供的车速信息周期为 30 ms(安全等级 SIL2)。制动系统可通过测速平台获取各车各轴车速值,用于制动相关控制。

2.3 信号系统需求

测速单元为头车和尾车(拖轴)提供车速接口,包括每个轴的车速值和方向,提供的车速信息周期为 50 ms(安全等级 SIL4)。信号系统可以通过测速平台获取拖轴的轮径和车速信息,综合加速度计信息计算得到列车级车速。

2.4 走行部系统需求

走行部系统从测速平台获取车速信息,对车速信息无安全等级要求。

2.5 车速表需求

头车和尾车车速表从测速单元各获取 1 路模拟量的车速值,用于网络系统故障时车辆的车速显示。

3 测速平台应用方案

以北京地铁某线路 4 编组列车为例,速度平台配置见表 1。

表 1 速度平台设备配置

Table 1 Speed platform equipment configuration

序号	设备	TMc1	Mp1	Mp2	TMc2	总计数量
1	速度传感器	4	4	4	4	16
2	测速单元	2	1	1	2	6

由表 1 可知, TMc 车测速单元和 Mp 车测速单元集成在网络系统设备远程输入输出单元(RIOM)插槽中,每个测速单元分别接入 4 个轴的速度传感器。速度传感器采用 2 通道电流型速度传感器,可以提供车速和方向信息。

测速平台统一采用 2 通道电流型速度传感器,速

度传感器主要技术参数如下。

- 1) 频率范围: 0~20 kHz;
- 2) 输出信号形式: 电流, 方波;
- 3) 输出通道数: 双通道;
- 4) 测试齿轮: 模数 $m=1$, 齿数 $z=160$, 材料为导磁低碳钢;
- 5) 输出信号的相位差: $90^\circ \pm 30^\circ$, 从齿轮端向驱动端视看, 顺时针旋转时, 1 通道超前 2 通道(适用于双通道)。1 通道和 2 通道输出信号相位差如图 1 所示。

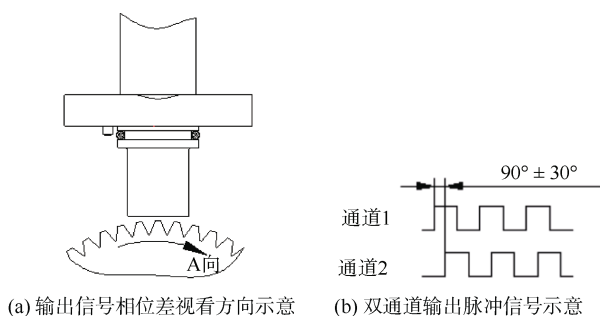


图 1 输出信号相位差示意

Figure 1 Schematic diagram of output signal phase difference

4 测速平台输出信息

4.1 SIL2 级车辆车速计算

测速平台通过部署在头上的 SIL4 级测速单元以及部署在中间车的 SIL2 级测速单元计算各车辆级速度。一个 SIL2 级速度单元支持接入 4 个轴, 速度单元通过获取各传感器上的脉冲信号, 根据测速算法计算得到每个轴的转速和方向。速度单元通过网络总线方式输出本车辆各轴的原始车速信息。

SIL2 级测速算法采用的是测周法, 即通过采集一个脉冲所用的时间来计算车速。车速计算测周法原理如图 2 所示。

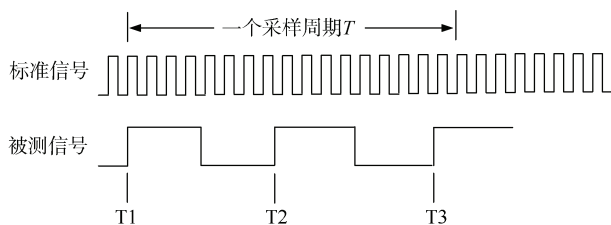


图 2 车速计算测周法原理

Figure 2 Diagram of the principle of velocity calculation using the measurement of periods

假设捕获连续两个上升沿信息需经过 N 个标准周期, 被测信号频率为 f , 传感器齿数为 M , 轮径值为 D ,

该频率对应的转速为 r , 因此转速为

$$\frac{M}{f} \times r = 1 \quad (1)$$

如果一个周期可能获取了 N 个脉冲上升沿的时刻信息, 其中第一个上升沿的时刻为 T_1 , 第 N 个上升沿的时刻为 T_n , 那么本周期计算得到的脉冲平均频率为

$$f = \frac{N-1}{T_n - T_1} \quad (2)$$

计算完成后需要将本周期最后一个上升沿的时刻更新为

$$T_{\text{last}} = T_n \quad (3)$$

本周期最后一个上升沿的时刻 T_{last} 用于后续计算采集到单个上升沿的情况。

这里需要对 $N \leq 1$ 的情况特殊考虑。如果本周期没有采集到上升沿, 则不进行计算, 维持上周期频率输出。

如果本周期采集到一个上升沿, 则需确定之前是否采集到上升沿, 如果采集到, 则得到频率为

$$f = \frac{1}{T_1 - T_{\text{last}}} \quad (4)$$

计算完成后需要将本周期最后一个上升沿的时刻更新为

$$T_{\text{last}} = T_1 \quad (5)$$

本周期最后一个上升沿的时刻 T_{last} 用于后续计算采集到单个上升沿的情况。

低速下, 可能几个周期都得不到一个脉冲, 这种情况需要特殊处理。经理论计算, 当前齿数的传感器, 在 0.5 km/h 对应的脉宽下, 10 个周期可以得到一个脉冲。因此, 如果连续 10 个周期都没有得到一个完整的脉冲, 认为当前零速。

可以采用流程图描述车速的计算方法, 如图 3 所示。

4.2 SIL4 级列车车速计算

测速平台通过部署在头上的 SIL4 级测速单元计算列车级车速。SIL4 级测速单元支持霍尔传感器和加速度计信息的接入, 信号系统通过从测速单元获取拖轴的原始测速信息, 结合空转滑行情况, 计算得到列车级车速。

当信号系统测速有效时, 列车控制与管理系 (train control and monitoring system, TCMS) 采用信号系统车速作为列车级参考车速。当信号系统测速无效时, TCMS 获取所有轴上的原始测速信息, 根据牵引制动工况, 选取不同的轴车速信息作为列车级参考车速。

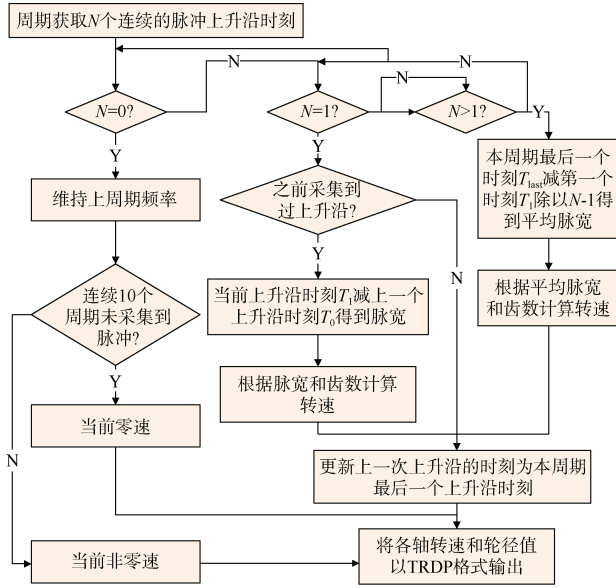


图 3 车速计算方法流程

Figure 3 Flowchart of velocity calculation method

牵引过程中，将所有有效的测速单元第二小参考车速和取平均得到列车级参考车速；制动过程中，将所有有效的测速单元第二大参考车速和取平均得到列车级参考车速；惰性时，速度选取沿用上一工况车速计算策略。

4.3 测速平台零速信息

采用测速平台后，TMc 车的列车级测速单元驱动控制零速列车线。TMc 车、MP 车的车辆级车速单元零速信号并联，驱动车辆零速列车线。当列车级测速单元出现故障或因故障切除时，由车辆级测速单元输出零速信号驱动控制零速列车线。零速判断速度范围为零速高电平小于 0.5 km/h，非零速低电平大于 3 km/h。

4.4 测速平台轮径信息

测速平台支持通过显示屏界面设置全列转向架参考轴的轮径值，并在显示屏上进行显示，且掉电后由测速单元保持设置值，设置参数需在 770 mm 到 840 mm 之间。

显示屏下发轮径校正命令之后，测速单元在判断满足列车速度大于 20 km/h，惰行工况维持 6 s 且无空转滑行故障发生时，依据某车辆的参考轴轮径值进行本车其他轴的轮径校正。

假设时间 T 内计算得到的 4 个轮的脉冲数分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 。参考轴轮径为 D_2 ，需要自动校正的轮径为 D_1 、 D_3 、 D_4 。那么时间 T 内，几个轴转动行走的距离是相等的，即

$$P_2 \times \pi \times D_2 \times T = P_1 \times \pi \times D_1 \times T = P_3 \times \pi \times D_3 \times T = P_4 \times \pi \times D_4 \times T \quad (6)$$

从而得到其他轴轮径分别为

$$D_1 = \frac{P_2 \times D_2}{P_1} \quad (7)$$

$$D_3 = \frac{P_2 \times D_2}{P_3} \quad (8)$$

$$D_4 = \frac{P_2 \times D_2}{P_4} \quad (9)$$

如果计算得到的轮径值在 770~840 mm，则测速单元保存该轴的轮径值，测速单元具备轮径值断电保存功能。

测速单元将校正过的各轴轮径值发给牵引系统、制动系统和信号系统。

4.5 测速平台超速信息

每车的测速平台输出超速信号，各车超速信号并联，驱动车辆超速继电器，超速继电器开关串联在制动安全回路里。

5 测速平台问题及优化方案

5.1 测速平台延时问题分析

最初的车速计算方案采用的是测频法，即通过采集固定周期脉冲数的方式计算测速，车速计算测频法原理如图 4 所示。

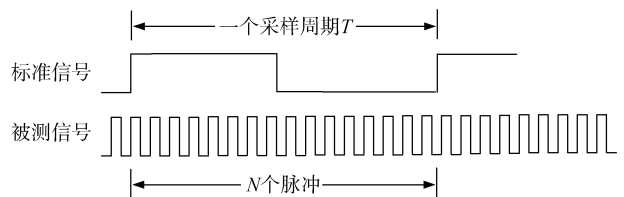


图 4 车速计算测频法原理示意

Figure 4 Schematic diagram of the principle of velocity calculation using frequency measurement method

从首次试验结果来看，制动系统从测速平台获取车速信息延时较大，现场测试车速延时约为 300 ms，导致防滑试验失败。

对于制动系统而言，当车速时间延迟在 50 ms 以下时，车速延迟对防滑控制性能影响可接受；若车速时间延迟超过 80 ms，则会增加擦轮风险；若延迟时间大于 100 ms，车速延迟对防滑控制性能影响不可接受。测速平台车速输出传输路径示意如图 5 所示。

经过分析，速度接口板经过 CAN 总线协议(CANFD)背板总线将测速数据发送给远程输入输出(RIOM)主

机, 该部分理论耗时 $T_a=40\text{ ms}$; RIOM 主机板到列车实时数据协议(train real time data protocol, TRDP)服务的理论耗时 $T_b=30\text{ ms}$; TRDP 服务到 TSN 网卡的理论耗时 $T_c<1\text{ ms}$; TSN 网卡到防滑控制(WSP)板的理论耗时 $T_d=50\text{ ms}$; 因此理论传输延时 $T_{\text{trans}}=T_a+T_b+T_c+T_d\approx 120\text{ ms}$ 。

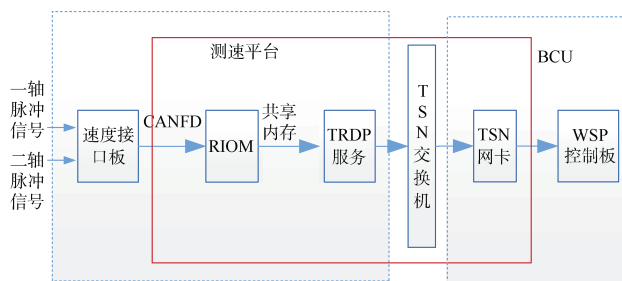


图 5 改进前测速平台车速输出传输路径示意
Figure 5 Diagram of the speed output transmission path of the speed measurement platform before improvement

该传输延时与试验得到的 300 ms 延时还是有较大差距, 经过分析, 发现另一部分延时是由于算法本身导致的。如图 4 所示, 测频法的一个缺点是在低速下可能几个周期才能得到一个脉冲, 而且由于齿数较低, 在相差一个脉冲会导致测得的车速出现较大的波动。因此在算法实现时, 采用了较大的采样周期 (360 ms), 如图 6 所示。一个微周期是 30 ms, 测频法采用 12 个周期取平均的方式, 因此 T_1 时刻采样的结果, 在 T_3 时候计算平均值发出, T_3 时刻对应的数值相比 T_2 时刻的数值, 延时了约 6 个周期。因为 T_3 时刻计算的值为 12 个周期的平均值, 平均值预计发生在第 6 个周期, 所以这种方法带来的理论平均延时 $T_{\text{sample}}\approx 180\text{ ms}$ 。

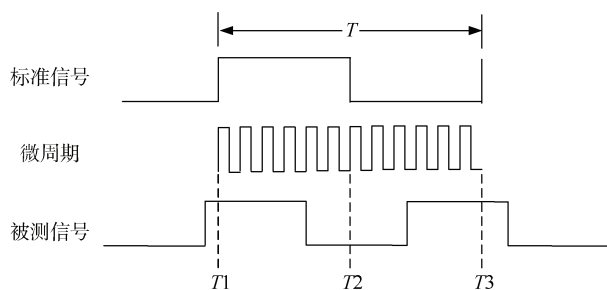


图 6 车速计算测频法延时示意
Figure 6 Schematic diagram of the delay of velocity calculation using frequency measurement method

因此总延时 $T_{\text{total}}=T_{\text{trans}}+T_{\text{sample}}\approx 300\text{ ms}$ 。

根据制动系统对车速延时的要求以及目前存在的

车速延时过大问题, 需要对测速平台方案进行优化。

5.2 测速平台优化方案

根据此前试验以及分析结果, 可以从缩短算法延时和缩短传输延时两个方面进行改进。

5.2.1 算法延时优化方案

算法改进前, 测速平台采用车速测频法, 通过增大采样周期的方式保证了低速下的测速精度, 带来的问题是算法延时, 因此可以通过缩短采样周期达到延时优化的目的。为了保证测速精度, 需采用测周法, 如图 7 所示。

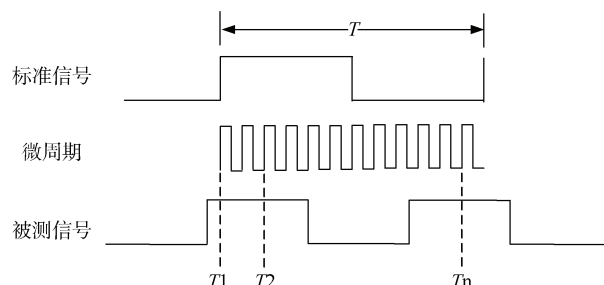


图 7 车速计算测周法延时示意
Figure 7 Schematic diagram of the delay of velocity calculation using periods measurement method

测周法采用了更小的微周期 10 us, 采样周期缩短到了 20 ms, 通过记录每个脉冲上升沿的时刻, 得到精确的脉冲个数和总脉宽, 车速值计算取 20 ms 采样周期所有脉冲的平均脉宽。该算法的延时理论分析值 $T_{\text{sample}}=10\text{ ms}$ 。

通过该项改进, 相较于之前的测频法, 可以将算法延时缩短了 170 ms 左右。

5.2.2 传输延时优化方案

传输延时环节此前采用的方案是 RIOM 中转加 TRDP 协议发送的方案, 改进后直接将测速单元接入 TSN 骨干网, 测速信息采用用户数据报协议(user datagram protocol, UDP)协议发送至制动本地单元。改进后的通信方案如图 8 所示。

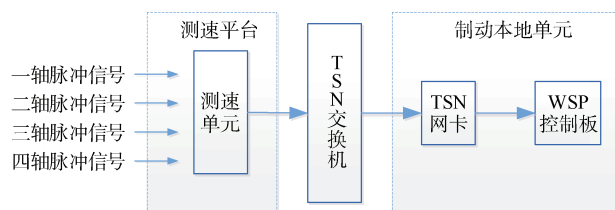


图 8 改进后车速传输路径示意
Figure 8 Schematic diagram of the improved speed transmission path

改进后,测速单元到 TSN 交换机的延时 $T_1 < 1 \text{ ms}$, TSN 网卡到 WSP 控制板的理论耗时 $T_2 = 50 \text{ ms}$; 因此理论传输延时 $T_{\text{trans}} = T_1 + T_2 = 50 \text{ ms}$ 。

通过该项改进,相较于之前的测频法,可以将算法延时缩短 70 ms 左右。

改进后的总延时 $T_{\text{delay}} = T_{\text{sample}} + T_{\text{trans}} = 60 \text{ ms}$ 。

测速平台优化前后测速延时对比见表 2。

表 2 测速平台优化前后延时对比表

Table 2 Comparison of delay before and after speed measurement platform optimization ms

类别	测速方法 延时	测速接口板发送 延时	RIOMP 板发送 延时	TRDP 服务发送 延时	WSP 控制板接收 延时	总延时
优化前	180 (测频法)	40	30	<1	50	300
优化后	10 (测周法)	0	0	<1	50	60

5.3 测速平台现场测试

测速平台方案优化前,现场测试测速平台车速延时为 300 ms 左右,制动防滑试验失败。

测速平台方案优化后,再次现场测试测速平台车速延时和制动防滑试验,一轴车速为防滑控制(WSP)板基于测速平台车速信息计算输出的车速,二轴车速为防滑控制(WSP)板基于轴端速度传感器硬线输出的车速信息计算输出的车速,通过对比同一时刻车速值估算测速平台延时,测速平台车速信息平均延时为 55 ms,与理论计算延时 60 ms 结果相符,试验数据见表 3。制动系统防滑试验结果合格,试验结果见表 4。

表 3 现场测试延时部分数据结果

Table 3 Partial data results of field test delay

时间/s	制动指令	一轴车速/(km/h)	二轴车速/(km/h)	瞬时减车速/(km/h)	平均减车速/(km/h)	延时/ms
35: 34.6	0	49.4	49.5	-1.07	1.14	24.37
35: 34.7	0	49.7	50	-1.11	1.14	73.10
35: 34.8	0	50.2	50.3	-1.05	1.14	24.37
35: 34.9	0	50.5	50.7	-1.11	1.14	48.73
35: 35.0	0	50.9	51.1	-1.08	1.14	48.73
35: 35.1	0	51.4	51.5	-1.14	1.14	24.37
35: 35.2	0	51.5	51.9	-1.11	1.13	98.33
35: 35.3	0	52.1	52.3	-1.16	1.14	48.73
35: 35.4	0	52.5	52.7	-1.09	1.13	49.16
35: 35.5	0	53	53	-1.13	1.14	0.00
35: 35.6	0	53.3	53.5	-1.07	1.13	49.16
35: 35.7	0	53.8	53.9	-1.13	1.14	24.37
35: 35.8	0	54.2	54.3	-1.06	1.13	24.58

续表

时间/s	制动指令	一轴车速/(km/h)	二轴车速/(km/h)	瞬时减车速/(km/h)	平均减车速/(km/h)	延时/ms
35: 35.9	0	54.4	54.7	-1.14	1.14	73.10
35: 36.0	0	55.2	55.5	-1.06	1.13	73.75
35: 36.1	0	55.2	55.5	-1.14	1.14	73.10
35: 36.2	0	55.7	55.8	-1.06	1.13	24.58
35: 36.3	0	56.1	56.3	-1.14	1.14	48.73
35: 36.4	0	56.4	56.7	-1.05	1.12	74.40
35: 36.5	0	57	57	-1.13	1.14	0.00
35: 36.6	0	57.2	57.5	-1.08	1.13	73.75
35: 36.7	0	57.7	57.9	-1.16	1.13	49.16
35: 36.8	0	58.1	58.3	-1.08	1.13	49.16

表 4 制动系统防滑试验结果

Table 4 Antislip test results of the braking system

序号	级位	车速/(km/h)	防滑效率/%	结论
1	电空混合最大常用制动	100	-	防滑保护功能正常,试验合格
2	电空混合快速制动	100	-	防滑保护功能正常,试验合格
3	纯空气最大常用制动	100	96	防滑保护功能正常,试验合格
4	纯空气快速制动	100	90	防滑保护功能正常,试验合格
5	紧急制动	100	92	防滑保护功能正常,试验合格

6 测试平台与传统测试方式对比分析

将传统测速方式与测速平台从系统安全可靠、系统成本、系统性能、车辆安装维护、发展趋势 5 个维度进行对比分析,具体见表 5。

表 5 传统测速与测速平台优劣势对比分析

Table 5 Comparative analysis of advantages and disadvantages between traditional speed measurement and speed measurement platform

名称	传统测速	测速平台	评价
系统安全可靠	信号 SIL4, 牵引/制动 SIL2	SIL4/SIL2 级测速	安全可靠,一致性
系统成本	—	传感器设备统型,减少 4 个光电传感器,信号系统成本降低;增加 2 块测速板卡,车辆成本增加	总成本下降
系统性能	信号光电传感器 200 齿;制动速度传感器硬线直接接入	测速传感器 160 齿,满足信号系统性能需求;测速平台输出车速信息给制动系统,满足制动系统性能需求;各系统车速来源一致,有利于提升车辆控制精度和后续故障排查	测速平台系统性能满足信号和制动系统性能要求

续表

名称	传统测速	测速平台	评价
车辆安装维护	速度传感器类型和数量多, 转向架走线复杂, 后续维护成本高	统一测速传感器类型, 数量减少, 简化转向架走线, 降低后续维护成本	测速平台转向架走线简单, 降低维护成本
发展趋势	—	构建统一的测速平台, 各系统车速来源一致, 符合车辆构建一体化平台的发展趋势	测速平台符合发展趋势

测速平台在不降低系统可靠性和性能的情况下, 降低了设备和后期维护成本, 简化了转向架走线, 各系统车速来源一致, 符合车辆控制一体化设计的发展趋势。

7 结束语

针对传统地铁车辆各系统各自配置速度传感器, 导致传感器数量和类型较多的问题, 本文提出了车辆测速平台的技术方案, 利用该平台可以统一速度传感器型号, 提供更准确的车速信息和轮径校验值以及硬线加网络的灵活接入车速信息的接口方式。为降低车速传输延时, 对车速计算方法进行了优化, 提出基于测周法进行车速计算的方法, 与原采用测频法计算车速方法进行比较, 本文所提方法降低了车速延时。经现场试验验证, 测速平台车速信息满足牵引、制动、信号、走行部等系统使用要求。

参考文献

- [1] 张静轩. 基于速度传感器和加速度传感器的测速算法应用研究[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(5): 33-38.
ZHANG Jingxuan. Research on application of speed algorithm based on speed sensor and acceleration sensor[J]. Automation & instrumentation, 2022, 37(5): 33-38.
- [2] 蔡焯, 王长林, 林颖. 基于轮轴速度传感器和加速度传感器的混合测速测距算法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(3): 32-37.
CAI Xuan, WANG Changlin, LIN Ying. Mixed speed and distance ranging algorithm based on odometer and accelerometer[J]. Urban mass transit, 2015, 18(3): 32-37.
- [3] 崔科, 董德存. 列车组合测速系统安全完整性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(7): 56-59.
CUI Ke, DONG Decun. Analysis of the safety integrity in integrated train speed measurement system[J]. Urban mass transit, 2017, 20(7): 56-59.

- [4] 马燕, 全瑞琴, 刘洋. 地铁车辆速度传感器通道故障分析及处理[J]. 内燃机与配件, 2020(11): 160-162.
MA Yan, QUAN Ruiqin, LIU Yang. Analysis and improvement of train speed sensor channel fault[J]. Internal combustion engine & parts, 2020(11): 160-162.
- [5] 王煜恺. 列车综合测速系统与模型预测控制在ATO中的应用[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.
WANG Yukai. Application of integrated speed measurement system and model predictive control of trains to ATO system[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2019.
- [6] 刘欢, 张岩, 吴艳鹏, 等. CRH380B型动车组测速原理及制动系统故障代码清除方法[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(2): 125-126, 130.
LIU Huan, ZHANG Yan, WU Yanpeng, et al. CRH380B EMU speed measuring principle and braking system fault code clearing method[J]. Urban mass transit, 2020, 23(2): 125-126.
- [7] 王灵丽. 基于CBTC的地铁列车组合定位技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
WANG Lingli. Research on subway train integrated location technology based on CBTC[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [8] 李强. 基于多源信息融合的地铁列车速度位置检测系统研究与设计[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
LI Qiang. The Research and Design of Multi-source information fusion Based Train Speed and Position Detecting System[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2014.
- [9] 张益晨, 王丽艳. 中低速磁浮列车测速系统研究分析与工程化应用[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 47-50.
ZHANG Yichen, WANG Liyan. Analysis and engineering application of medium and low speed maglev train speed measurement system research[J]. Urban mass transit, 2022, 25(7): 47-50.
- [10] 张馨月. 基于多传感器信息融合技术的中低速磁浮测速测距技术[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
ZHANG Xinyue. Medium and low speed maglev speed and displacement measurement technology based on multi-sensor information fusion technology[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

(编辑: 王艳菊)